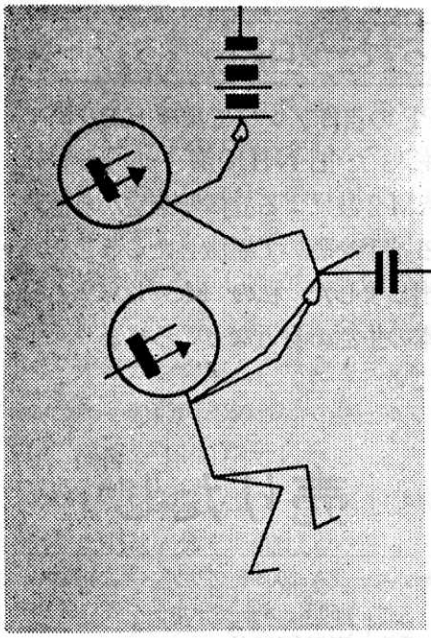


SRPPとその類似回路の動作をどう考えるか？

非線形回路解析の1つの試み

佐藤康夫

3月号 p.278～p.279 に「SRPP回路と擬似（？）SRPP回路」という杉山氏の報告を掲載いたしましたが，これについて，そのおりご意見をいただいた佐藤氏より，以下のような回路解析と実験結果が編集部まで寄せられました．

同じプッシュプルといっても，SRPP回路と標準PP回路ではひずみの発生条件がぜんぜん違うというだけでなく，非線形性をもった素子を使った回路をどう考えればよいのか，という点でたいへん貴重な報告かと思います．（編）

本誌3月号に掲載された杉山氏によるSRPPと擬似（？）SRPPと題する記事は，たいへん興味深く拝見しましたが，少しフに落ちない点もありますので，私も少しばかりこの回路の解析と実験をやってみました．限られた日時の間にやったため，まだ解明されない点も多々ありますが，とりあえずこれまでに得られた結果を発表し，読者の皆さんのご参考に，供する次第です．

はじめに，杉山氏の記事でフに落ちない点というのを少し列記してみますと，

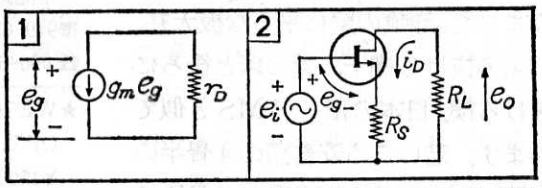
(1) 同氏が実験された回路（3月号278ページの**第7図**）は，下側のFETのソースにパスコンが入っていないので，この回路のゲインは，同ページの**第1図**および**第2図**の等価回路より計算された(1)式および(5)より低いはずであり，その差はR_Lが低い場合，ちょうど6dBになるが，**第1表**では逆に，実測値の方が計算値より大きくなっているのは何故か？

(2) 同一負荷抵抗に同一出力電圧を出している状態で，PPとシングルのひずみ率を比較すれば，PPの場合の方が個々のFETの出力電流が少ないため，それだけで低ひずみになる可能性があり，PPによって偶数次高調波が打ち消された効果と，どちらがどれだけきいているのか区別できないのではないか？

(3) SRPPでも偶数次高調波が打ち消されるというのはほんとうか？ ちょっと考えても，非線形素子を1度通った出力と，2度通った出力を合成して，打ち消しが完全に行なわれるとは思えない．

(4) シングル動作の場合でも，偶数次高調波を打ち消す方法があるか？

以上のうち，(1)については杉山氏に調べていただくとして，(2)に対してはPPのときの負荷抵抗をシングルのときより低くするか，同一負荷抵抗，同一入力電圧の下でのひずみ率を比較した方がよいと思います．(3)，(4)については，杉山氏のいわれるとおり非直線性を考慮に入れた解析が必要になります．もとより，非線形系を取り扱う一般的方法などは存在しませんが，話をFETの低周波等価回路程度に限れば，少し代数計算が複雑になるだけである程度まで解析できることがわかりました．すでに同様なことが発表されているかも知れませんが，私の知るかぎりでは見当らないようですので，1つの試みとして見ていただき，皆さんのご批判を仰ぎたいと思います．



〈第1図〉FETの等価回路 〈第2図〉FETシングル回路

FET回路の基本

さて，**第1図**のFETの等価回路において，2つのパラメータ，g_m，r_Dともに非線形性を持っているわけですが，両方を同時に考えると，非常に複雑になるので，2つの場合に分けて考えることにします．

(1) **$R_L \ll r_D$の場合**

このときはr_Dの影響をほとんど無視できるので，g_m の非線形性だけを考えればよいことになります．

(2) **$R_L \simeq r_D$または$R_L > r_D$の場合**

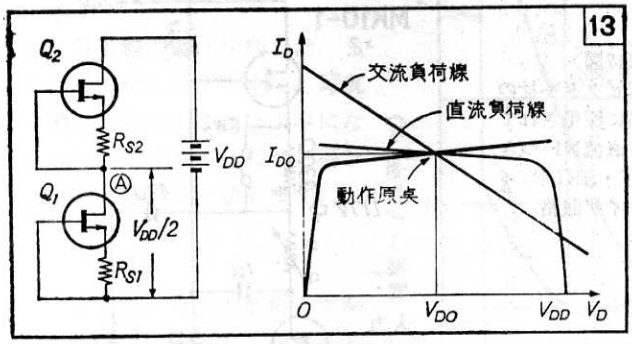
このときはi_Dの振幅が非常に小さくなるので，電流源の非線形性は無視できて，r_Dの非線形性だけを考えればよいことになります．

これらの中間の領域では両方の影響を同時に考えなければなりませんが，そのかわり，どちらからの寄与も比較的少ないので，結果的にはいちばんひずみの少ない領域となるので，今回は一応はぶくことにしました．

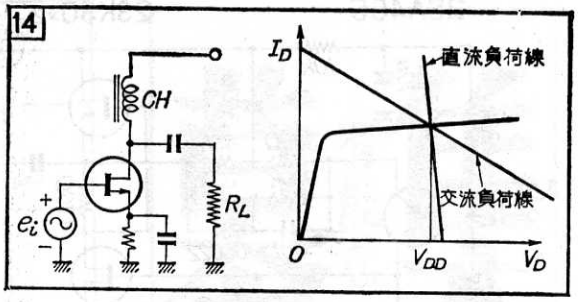
(1) の場合．普通行なわれているように，電流源を巾級数で表わすと，式(1)になります．

$$e_g = E_g \sin \omega t$$

とおくと，式(2)を使って式(3)が得られます．式(2)より，奇数次の巾からは基本波成分と奇数次高調波が，偶数次の巾からは直流分と偶数次高調波が発生することがわかります．



〈第13図〉直流安定度．この形ではかなり悪いので，改良策が必要



〈第14図〉チョーク負荷ならもちろん安定

が，擬似 SRPPと呼ぶのは，あまり適当ではないと思われます．何故なら，これらの回路において，Q_2は単にパッシブな非線形素子として動作しているだけあって，全然負荷に出力を供給していないからです．

⑵ SRPP動作

最後にふたたびSRPPに戻って，**第3図B**に対する等価回路をかくと，**第12図**になります．この回路に対して節点方程式をかくと式(21)になります．式(21)からe_1を消去すると，4次方程式になってしまいますので，解くのはやめて定性的な考察だけに止めることにします．結論を先にいいますと，この場合は SRPPの方がシングルよりもひずみが多くなります．その理由としては次の2つが考えられます．

1) **第12図**で，AA′より右を見たインピーダンスは式(24)のようになるので**第10図**にくらべて，非線形性の補償が不完全になる．

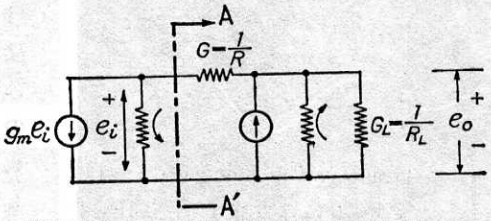
2) $g_m e_i$ が無ひずみでも，式(18)のようにRを流れる電流はひずんでいるので，Q_2の出力もひずんでいる．

以上でだいたい交流動作の解析を終ったわけですが，大出力を目的とするときは SRPPの方が，高利得を望むときは**第5図A**のシングルの方が，それぞれひずみを少なくできる，というのが結論になります．

直流安定度の向上法

次は実験結果の説明に入るわけですが，その前に，これらの回路の直流動作点の安定度の問題に，ちょっとふれておきたいと思います．

シングルも，PPも直流回路は同じで，Q_1，Q_2 とも自己バイアスにしたときは，**第13図A**のようになります．V_D-I_D 特性上に Q_1の直流ロード・ラインを引くと，**第13図B**に示すようにちょうど Q_1 の特性を裏返ししたものになります．図では，わかりやすくするために，少し傾斜を強くしてありますが，実際の特性は，R_Sによる NFのため普通の静特性よりもさらに水平に近くなっています．



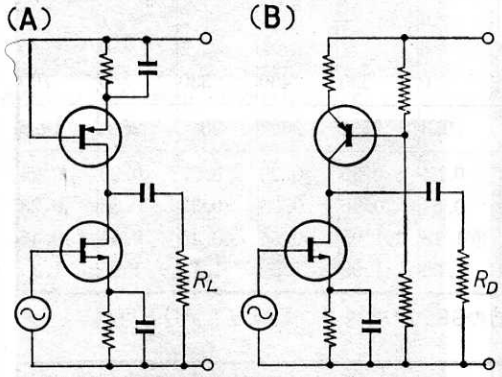
〈第12図〉これでは非線形性の補正は不十分

したがって，この回路の動作点の安定度は非常に悪く，また，どちらかの R_S を可変にしておかなければ，Ⓐ点＝Q_1 のドレイン電圧を，電源電圧の1/2にすることもできません．

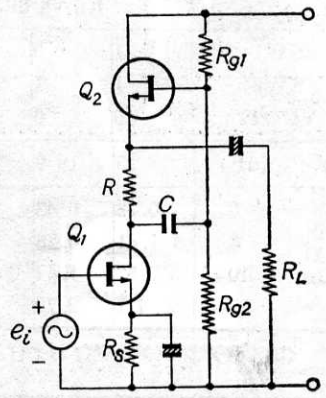
第14図Aのチョーク結合なら，**第14図B**のようになって，安定度は非常に良いわけです．

またシングル動作なら，**第15図A**，Bのような回路もできますが，動作点の安定度の悪いのは同じことです．ただAでは，特性のまったく同じコンプリメンタリの FET があれば，**第5図A**の場合と同じく，非線形性の補償が期待できますが，Bではそれもできません．

安定度を良くするには，直流 NFをかけるか，**第16図**の回路を採用すれば



〈第15図〉直流安定度のよいシングル回路



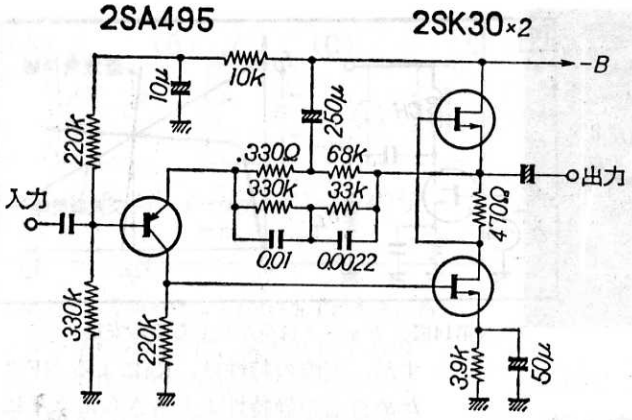
〈第16図〉直流安定度のよいSRPP

社員募集

電気の街――秋葉原で、オーディオ製品の販売実績随一を誇る《木村無線》が、オーディオに興味をもつ若人を求めております。あなたの趣味と実力が活かされる快適な職場をお選び下さい。

■学歴、年令、男女＝不問
■待遇＝実力本位高給優遇
■職種＝販売責任者及び担当社員・技術担当
■厚生、失業、健康等各種保険制度完備
■寮完備＝地方の方も入寮できます。
■退職金制度あります。
■応募者は左記へ、履歴書写真をお送り下さい。面接日を通知いたします。

木村無線
東京都千代田区外神田一の一の五昌平橋ビル内 〒101
電話〈03〉〈二五三〉三五七六
〈二五三〉二八七六



〈第17図〉
日本ビクター社の製品に採用されている直流NFつきFET・SRPP イコライザ回路

良いわけです．直流 NFをかけた実例として，**第17図**に日本ビクターのイコライザに使われている回路をあげておきます．

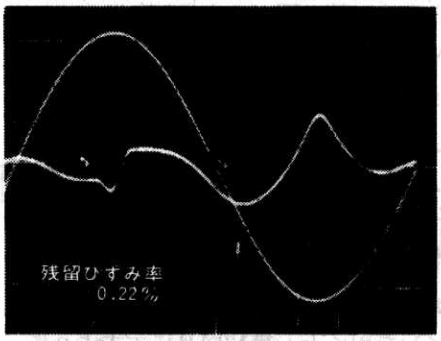
第16図の場合，動作点の安定度に関しては問題がなくなりますが，R_{g1}//R_{g2}がQ_2の増幅作用によって見掛け上小さく見えるので，R_Lが高いときは，Cに割合大容量のものが必要です．

しかし，FETの場合はR_gを大きくできるので，電解を使わなければならぬほど大容量にはなりませんし，制御抵抗Rの値を自由に選べるという長所もありますので，今回の実験にはこの回路を使いました．

実験回路での検討

(1) ひずみ率の測定

第18図に実験した回路を示します．FET は手持ちの関係で，三菱電機製の MK-10-1 を使いました．記入電圧は 100kΩ/V のテスターで測ったものです．使用した FET の動作点におけるg_mは，約3mひ，r_Dは55kΩ くらいです．



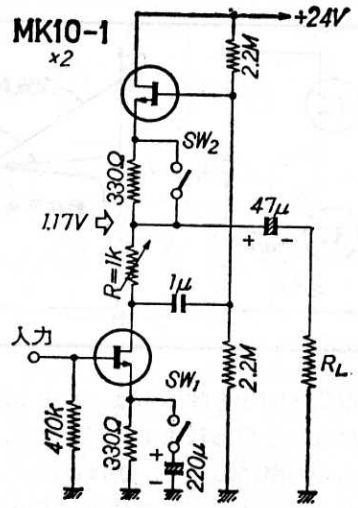
〈写真①〉発振器の出力波形とひずみ

動作 / 測定条件	シングル R_L=6.8kΩ				SRPP R_L=3.3kΩ				
SW1	1	0	1	0	1	1	0	1	0
SW2	1	1	0	0	1	1	1	0	0
VR(Ω)	0	0	0	0	330	450	330	780	700
ゲイン(dB)	25	18.9	25.3	19.3	25.4	26.7	20	26	19.6
出力 dBm 0	0.78	0.43	0.64	0.34	0.35	0.28	0.27	0.25	0.24
出力 dBm 5	1.41	0.78	1.17	0.61	0.56	0.35	0.32	0.35	0.28
出力 dBm 10	2.57	1.44	⑤ 2.2	⑥1.18	②1.05	④0.54	③0.45	0.64	0.46
出力 dBm 15	4.7	2.75	3.7	2.05	1.98	1.5	1.1	1.95	1.3

〈第1表〉シングル動作および動作時のSRPPひずみ率．○は写真番号と対照．

動作 / 測定条件	シングル R_L=100kΩ				SRPP R_L=3.3kΩ			
SW1	1	0	1	0	1	1	0	1
SW2	1	1	0	0	1	1	1	0
VR (Ω)	0	0	0	0	330	450	330	330
ゲイン(dB)	36	31.6	37.7	33.7	38.9	35.4	39	35.7
出力 dBm 0	0.28	0.25	0.59	0.29	0.67	0.31	0.91	0.5
出力 dBm 5	0.32	0.39	0.95	0.33	1.09	0.37	1.52	0.77
出力 dBm 10	⑦0.57	0.77	1.6	0.57	1.87	0.64	2.67	1.3
出力 dBm 15	1.63	1.83	3.03	1.55	3.4	1.77	5	2.58

〈第2表〉負荷 100kΩ のときのシングルおよびSRPP 動作時のひずみ率．



〈第18図〉実験に採用した回路

最初に式(13)の結果を確かめるため，出力を一定に保ちながら，Rをいろいろ変えて，ひずみ率を測定した結果が**第19図**です．使用した低周波発振器の残留ひずみが0.22%と比較的多いので図中に点線で示してあります．あまりひずみの少ない領域では比較しにくいので，出力電圧は10dBmと比較的高いレベルにとってあります．負荷抵抗の3.3kΩという値は，入力を増していったとき，出力波形の上下が同時にクリッピングしはじめる程度に選んだものです．

ごらんのように，**第4図**の動作に相当するAカーブでは，ぴったり理論値と一致していますし，Bでは(13)′式できまる値よりやや小さめになっていますが，傾向としては合っています．

Rの最適値が(13)′と合わないのは，あまりRを大きくすると，省略した高次の項がきいてくるためと思います．なお，以後の測定も周波数はすべて1kHzです．

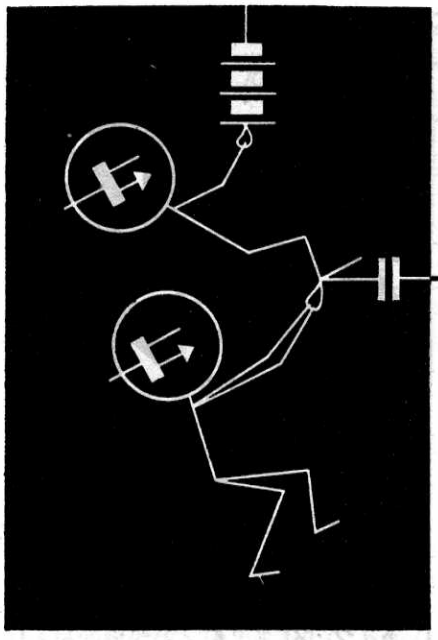
次にシングルとSRPPのひずみ率を比較するために，種々の動作状態でひずみを測定したのが，**第1表**と**第2表**です．

予想どおり，R_Lが低い場合はSRPPの方が良く，R_Lが高い場合は，逆にシングルの方が良くなっています．

(2) オシロ波形による観測

ひずみの内容を見るために，ひずみ率計の出力のオシロ写真をとりましたので，あわせて見てください．

写真❸❶❼では，いずれも第2調波がほとんどなくなっているのがわかり



続・非線形回路をどう考えるか？

1．シングル動作の回路解析

佐藤康夫

本誌6月号に引続き，ＦＥＴのひずみの解析と，その後に得られた実験結果を発表させていただきます．

前回の記事中に，誤植のため意味の不明な点があったと思いますので，一部重復しますが，くわしく説明いたします．

非線形受動素子の特性の表現とシンボル

非線形受動素子といっても，ダイオードやバリスタのような強い非線形のものでなく，真空管，トランジスタ，あるいはＦＥＴ等の内部抵抗のように，従来線形近似で間に合わせていた程度の，弱い非線形特性を解析的に扱う方法を考えることにします．

受動素子ですから，とうぜん電圧-電流特性は単調増加になりますが，その他に，動作領域内に変曲点をもたない，という条件を加えると，**第1図**の2種の特性が考えられます．**同図**の特性に対して，電圧を独立変数にとるか電流を独立変数にとるかによって，

$$i = g(e) \quad \cdots\cdots(1)$$

$$e = r(i) \quad \cdots\cdots(2)$$

の2通りの表現が可能ですが，節点解析なら(1)を，網路解析なら(2)を使わなければなりません．

(1)または(2)式を2次関数で近似した結果が，**第2図**および**第3図**です．素子のシンボルに付けた矢印は，その素子が，

1. 非線形であることを示す
2. 単方向性であることを示す
3. グラフの凹凸を示す

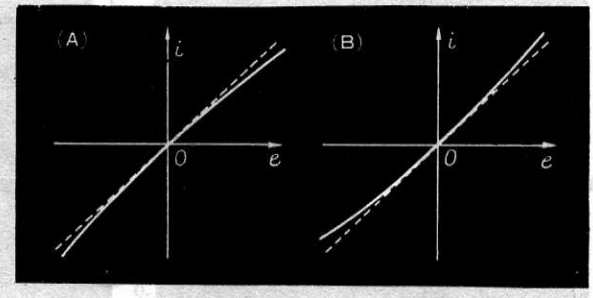
という3つの目的を持っています．

第2図と**第3図**のあいだで，厳密な等価変換はできませんが，$g \gg he$ または $r \ll si$ ならば，

$$r = \frac{1}{g},\quad s = \frac{h}{g^3} \quad \cdots\cdots(3)$$

$$g = \frac{1}{r},\quad h = \frac{s}{r^3} \quad \cdots\cdots(4)$$

によって近似的に変換が可能です．この変換によって矢印の凹凸も入れかわります．



第1図―2種類の非線形特性

ＦＥＴのドレイン特性は，上に凹な曲線になっているので，Ｎチャネルなら**第2図**(A)，Ｐチャネルなら**同図**(B)があてはまります．

第2図の素子を並列に接続すると，**第4図**のようになりますが，このうち(B)または(C)のようにすると非線形が打ち消されます．これがシングル動作で2次ひずみを打ち消す第1の方法です．6月号第5図(A)と第15図(A)が，それぞれ**第4図**(B)と(C)に該当します．そこで，これらの回路をかりに，逆並列シングル略してＲＰＳ回路と呼ぶことにします．

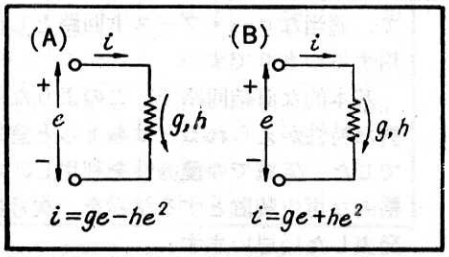
直列接続の場合は，**第3図**の表現を使ったほうが計算が簡単ですが，(3)，(4)式を使って**第5図**のように等価変換することもできます．

電流源と電圧源

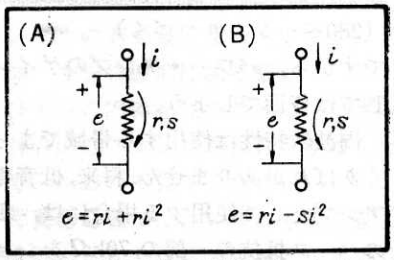
線形回路では，電流源と電圧源はいつでも等価変換できるので，5極管やトランジスタ，ＦＥＴ等の定電流源に近い性質のものでも，電圧源等価回路を使って解析することができます．

しかし，内部抵抗の非線形性を考慮に入れると，これらの素子に対しては電流源等価回路しか使えなくなります．その理由は**第6図**に示すように，これらの素子の特性曲線群は，上下に平行移動した場合ほぼ重なるとみなせるので，**第7図**の等価回路を使った場合にのみ，パラメータが定数となるからです．

これに反して3極管の特性は，**第8図**のように左右に平行移動した場合にほぼ重なるので，**第9図**の等価回路を使わなければなりません．



第2図―電圧を独立変数にとった場合

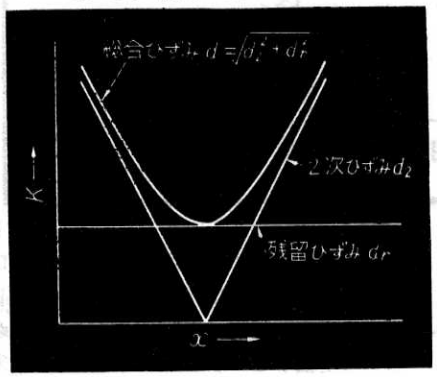


第3図―電流を独立変数にとった場合

R_L (kΩ)	6.8		100	
SW_1 {1:ON 0:OFF}	1	0	1	1
SW_2 〃	1	1	1	0
ゲイン (dB)	25	18.9	—	—
ひずみ率 (%)	2.57	—	0.57	1.6

$VR=0$, $e_0=10$ dBm

第2表―計算に使ったデータ



第23図―第22図の曲線の頭が丸くなる理由

$$|A|=\frac{g_m}{2g_D+G_L} \quad \cdots\cdots(37)$$

を使って求めることができます．この場合 G_L が小さいほうが精度が高くなるので，**第2表**の右側より，

$G_L=1/100k\Omega+1/500k\Omega=0.012m\mho$

（後の項は Q_2 の R_g によるものです）と $|A|=63$ を(37)式に代入すると，

$g_D=0.018m\mho$

となります．これは抵抗値にすれば，55kΩ ということになります．

つぎに(12)式を使ってkとmの比を求めます．**第20図**(A)に対しては，(12)式は，

$$\frac{m}{k}=\frac{2g_D+G_L}{g_m} \quad \cdots\cdots(38)$$

となりますから，これに上記の数値と**第22図**の曲線Aの最小点の G_L の値 $0.03m\mho$ を代入すれば，

$$\frac{m}{k}=0.022 \quad \cdots\cdots(39)$$

となります．**第20図**(B)の回路に対しては，(38)式は，

$$g_D+G_L=\frac{g_m}{2}\,\frac{m/4}{k/8}=g_m\frac{m}{k} \quad \cdots\cdots(40)$$

となります．したがって最適 G_L は，

$G_L=0.03+0.018=0.048m\mho$

$=1/21k\Omega$

となるはずです．**第22図**の曲線Bの最小点がちょうど21kΩになっているのは，(12)式を導くのに用いた仮定が正しかったことを裏書きするものといえましょう．kとmの実際の値は，**第20図**(A)のひずみ率の式，

$$K=\frac{kE_g}{2g_m}-\frac{mE_0}{2gm} \quad \cdots\cdots(41)$$

と(39)式とから求めることができます．

第2表より，

$E_0=\sqrt{2}\times\sqrt{600\Omega\times0.01W}$

$=3.46V$

$|A|=17.8$

$E_g=0.194V$

$K=\sqrt{2.57^2-0.5^2}$

$=2.5(\%)$

ですから，

$k=1.25m\mho/V$

$m=0.027m\mho/V$

となります．

最後にhは，**第20図**(C)の回路に対するひずみ率の式，

$$K=\frac{0.5hE_0}{2(1.5g_D+G_L)}-K_m+K_k \quad \cdots(42)$$

から求めます．右辺の後の2項は，R_L が大きいときは(A)の回路のひずみ率と同じになりますから，**第2表**の右側の2つの欄の差をとれば，正味の K_h が得られます．よって，

$$\frac{0.5h\times3.46}{2(0.027+0.012)}=0.016-0.0057$$

$h=4.5\times10^{-4}m\mho=0.45\mu\mho$

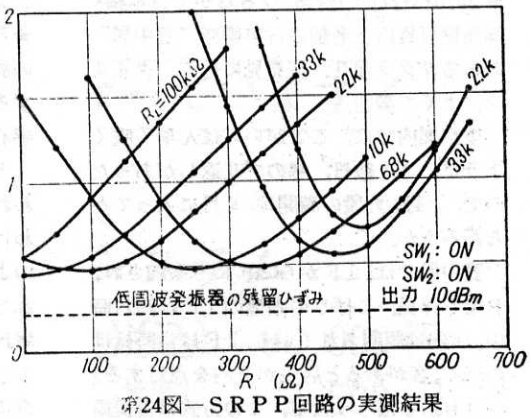
となります．

これですべてのパラメータの値が求まりましたので，(13)式に代入するわけですが，**第20図**(C)の回路に対しては(13)式のhはh/2に，g_D は $3g_D/2$ になることに注意する必要があります．かくして**第20図**(C)の回路の最適 G_L は，

$$G_L=\frac{3\times10^{-2}}{2\times1.25}\times(2.7+\sqrt{2.7^2+2\times4.5\times1.25})-0.027=0.057m\mho=1/17.5k\Omega$$

となります．**第22図**の曲線Cを見れば，理論と実験の一致はまったく申し分ないといえます．

これでシングル回路の解析は，全部終了しました．まだSRPPが残っていますが，原稿の締切日が来てしまいましたので，**第24図**に実測データをかかげるにとどめます．（つづく）



第24図―SRPP回路の実測結果

■ 6月号訂正 ■

【p. 295】 ▶第3図の説明文を**抹消**，(B)図中**R**の文字が脱落．▶第5図と第6図の説明文でSRPPは**シングル**の誤り．▶(2)式5行目で**nが奇数のときn=2m+1とおくと**が脱落．

【p. 296】 ▶第7図(B)で電圧eの極性は**上が(+)で下が(−)**，同 $i=-\{g_D(-e)-h(-e)^2\}=g_De-he^2$ は $i=\cdots\cdots=g_De+he^2$ の誤り．▶(19)式を $K=g_mhE_g/2(g_D+G_L)^2$ に訂正．▶第2段16行目 $h<0$ は $h>0$ の誤り．

【p. 297】 ▶第12図で2番目の e_i は e_1 の誤り．▶第15図の説明文で安定度のよいは**悪い**の誤り．

【p. 298】 ▶第2表でSRPP $R_L=3.3k\Omega$ は**100kΩ**の誤り．▶第18図は**本号第19図**のように訂正．

電気機器の修理に部品の製作に試作研究に
小型万能工作機械 ユニマット
（オーストリー製）
振り：70mm
心間：165mm
御用途に応じて付属品をお選び下さい。
旋盤・ボール盤・フライス盤・糸鋸・丸鋸等十数種の組替えが出来ます。
金属の他、木材・プラスチックも加工できます。
特約販売店 東京電気貿易株式会社
〒105 東京都港区西新橋3－19－14千代田会館ビル
TEL (433) 4737・(432) 6432